

磁場を用いた、相対論的ジェット
加速モデル

- 磁気ロケット -

京都大・天体核 M1

仲内 ^{だい すけ} 大翼

目次

1. 相対論的ジェットと磁気加速モデル
2. 磁気ロケットモデル
 - ・動機
 - ・モデルのあらまし
3. まとめ

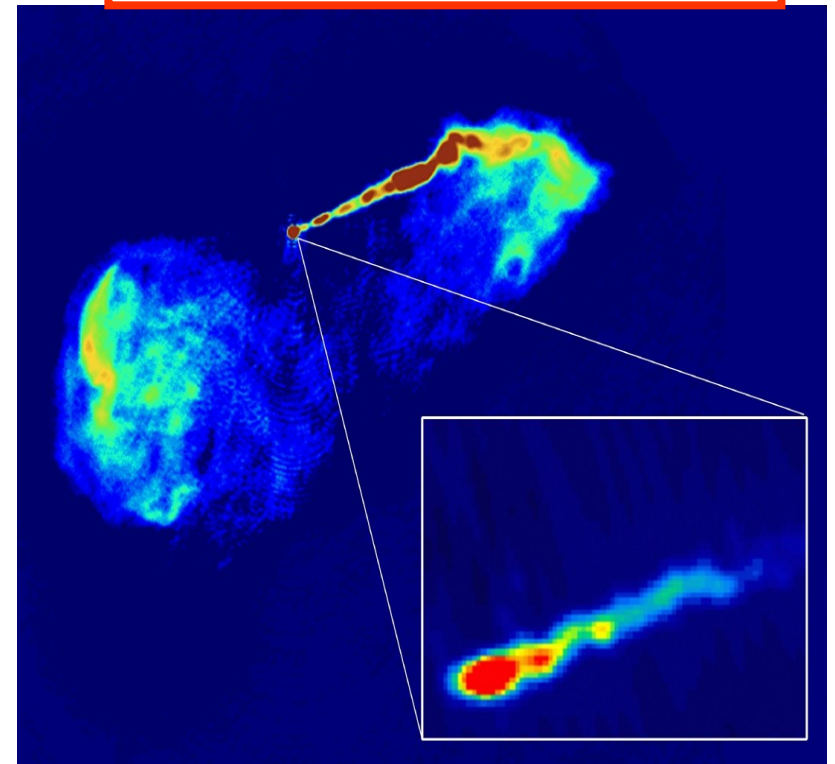
1. 相対論的ジェットと 磁気加速モデル

相対論的ジェット

- 相対論的ジェット：
中心天体から放出される
相対論的なプラズマの流れ
- 観測的特徴：
 - ①細長い
 - ②強い電磁波源



楕円銀河M87のジェット

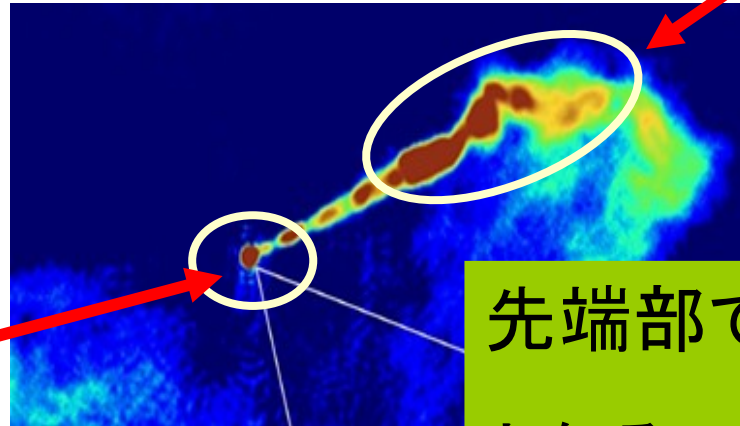


磁気加速モデルで説明できる可能性がある。

磁気加速モデルの難点

• **σ 問題**: $\sigma = \frac{B_R^2 / 4\pi}{\rho c^2}$

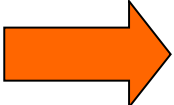
観測から $\sigma \ll 1$



磁気加速モデルでは $\sigma_0 \gg 1$ と仮定

先端部で $\sigma \ll 1$

となるモデルを作れるか？

例) 定常モデル:  問題あり！

• $v \sim c$ まで加速はできる。 • しかし $\sigma_{\text{final}} > 1$

2. 磁気ロケットモデル

動機

1. σ 問題をクリアしたい。



時間依存のあるモデル

2. $\Gamma > 100$ に達する加速モデル作りたい。

3. 応用面 : **ガンマ線バースト** (GRB) 現象

- ・激しい時間変動もつ

- ・ $\Gamma > 100$ のシェルが関与すると考えられている

• 1., 2. を満たすモデル



GRB の特徴を説明できる可能性がある。

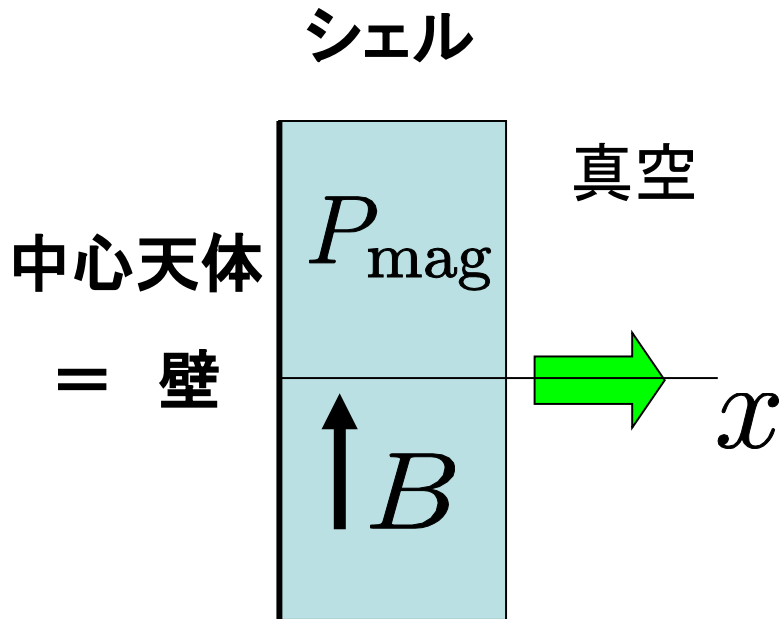
方程式系

- シェルの運動：
 - 相対論的MHD方程式
 - 適当な条件下で数値計算。

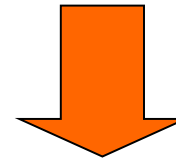
以下、オーダー計算でおよその振舞いを見る。

モデルのあらし

磁気ロケット - 離陸 -



•壁の上に置かれた、一様な磁場を
帯びたシェル



磁気圧勾配により加速

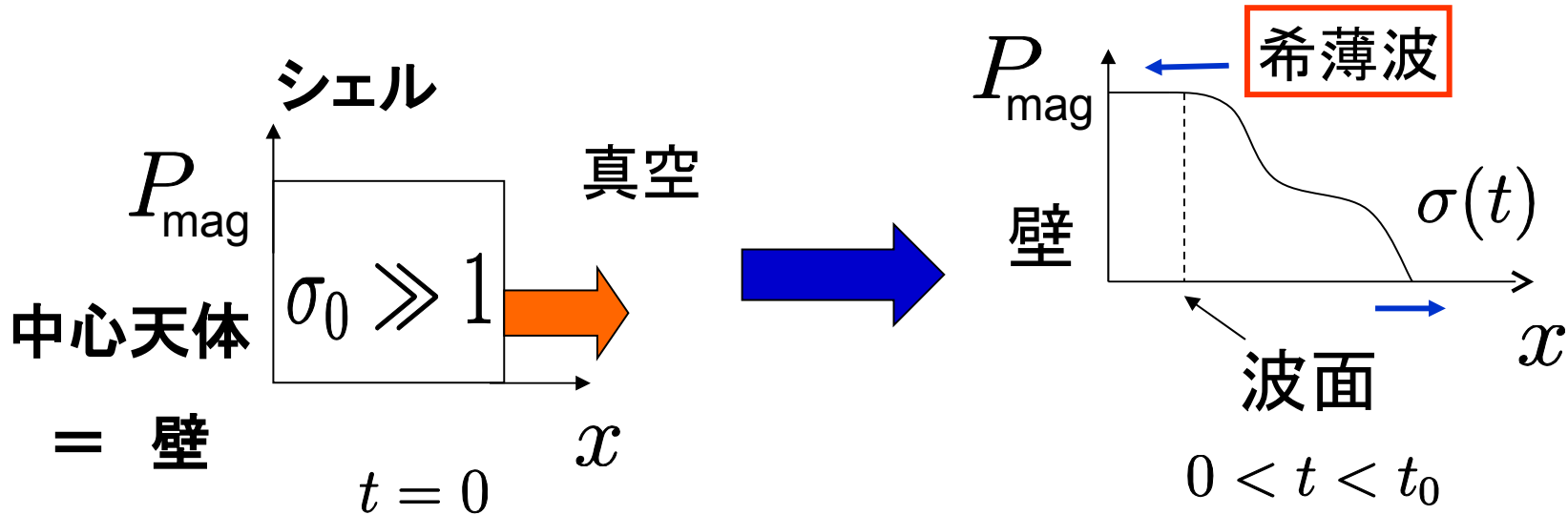
$t = 0$

$$\sigma_0 \gg 1$$

(熱力学的な効果は無視)

磁気ロケット - 離陸 -

圧力分布の時間変化



シェルは $+x$ 方向の速度を得る。

希薄波が壁に達すると、シェルは離陸。

$(t = t_0)$

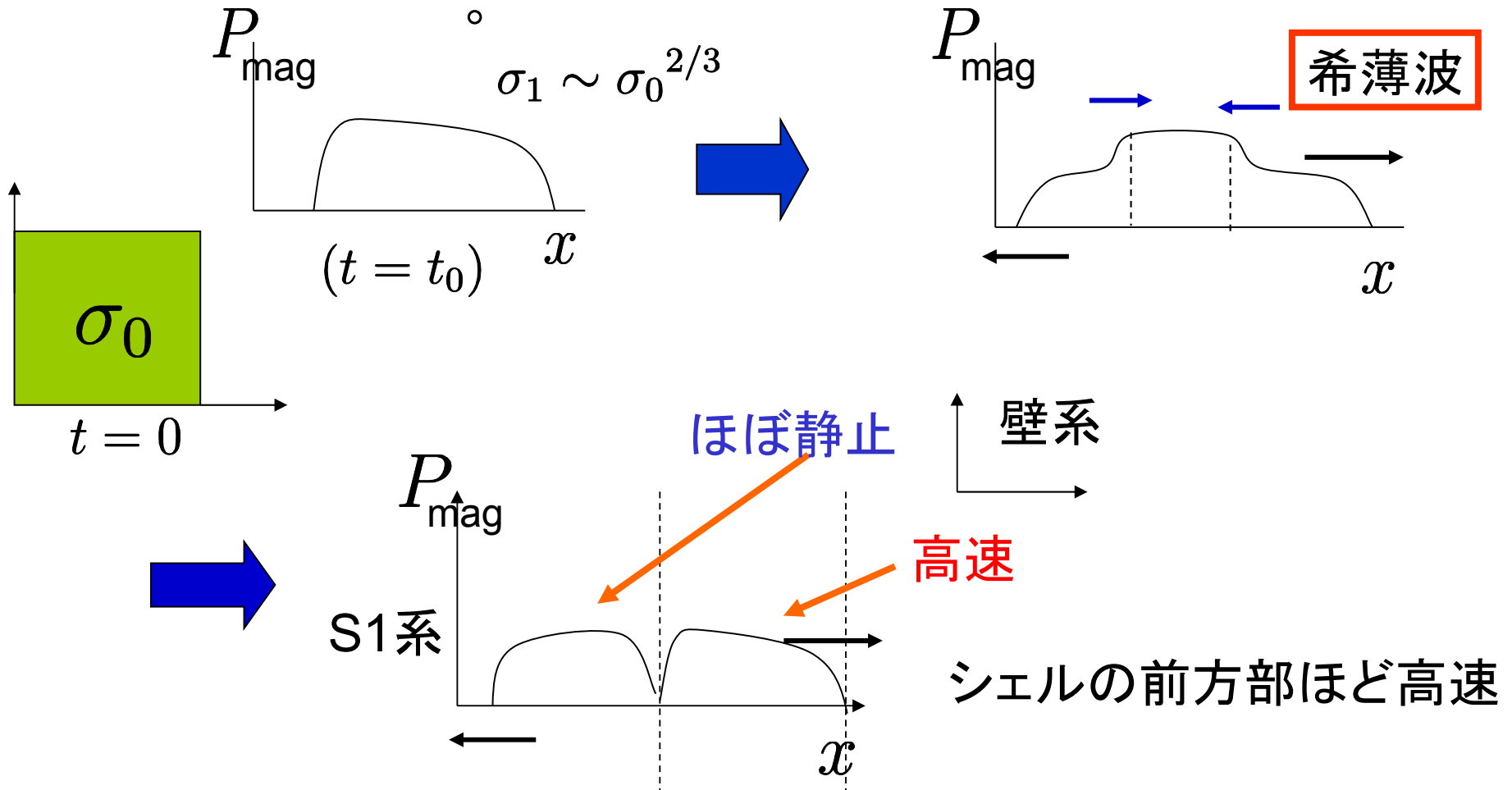
$$\Gamma' \sim \sigma_0^{1/3}$$

$$\sigma' \sim \sigma_0^{2/3}$$

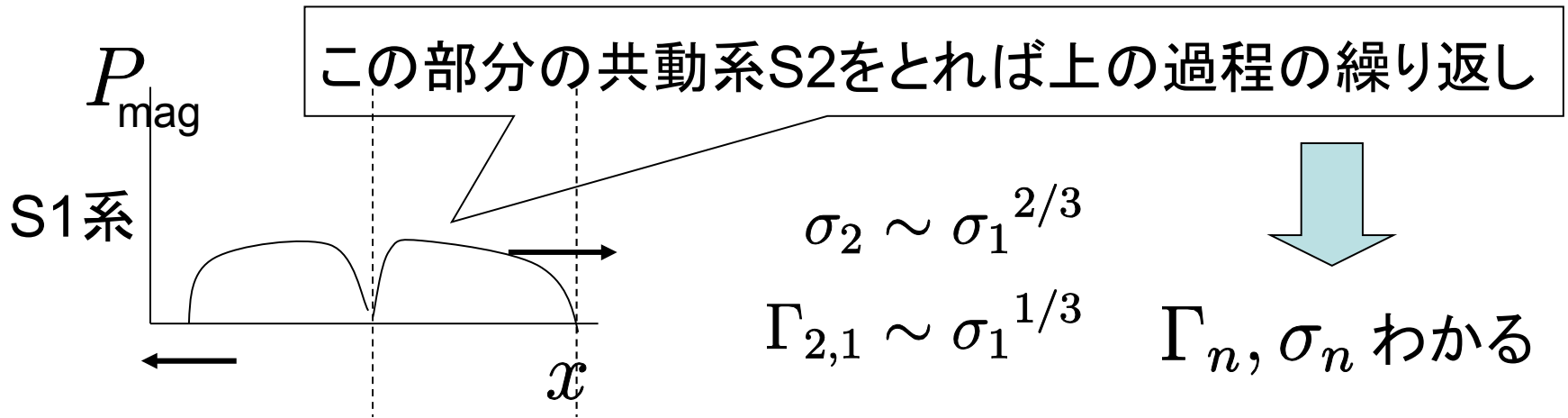
$(t = t_0)$

磁気ロケット - 噴射 -

新たに共動系S1からシエルの運動見る



噴射段階の時間依存性



- $\sigma \sim 1$ ($t \sim t_c$) で、この段階は終わる。

$$\Gamma(t) \propto t^{1/3}$$

$$\sigma(t) \propto t^{-1/3}$$

$$t_c = \sigma_0^2 t_0$$

このとき

$$\Gamma \sim \sigma_0$$

$$\sigma \sim 1$$

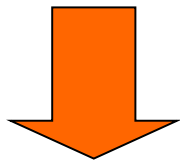
磁気ロケット - 航行 -

- 噴射終了後 $t > t_c$
- 磁場弱くなっている。



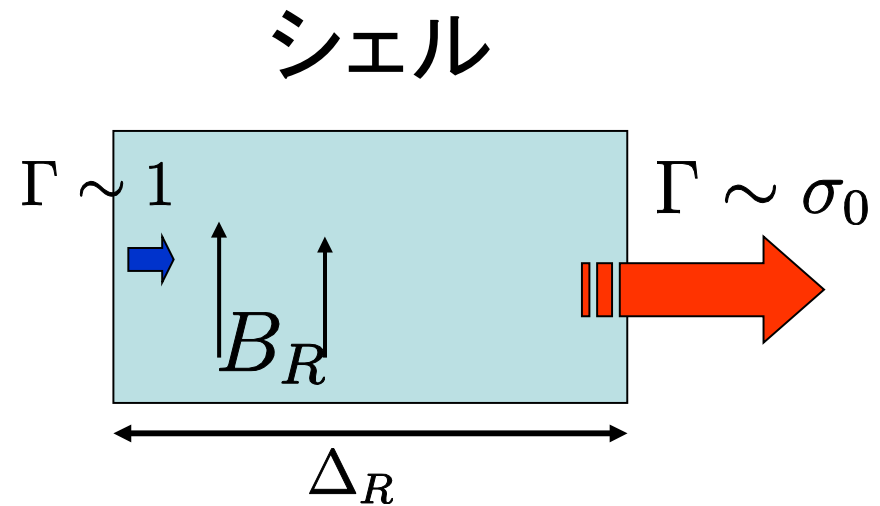
等速運動 $\Gamma \sim \sigma_0$

シェル幅 $\Delta_R \propto t$ で広がる

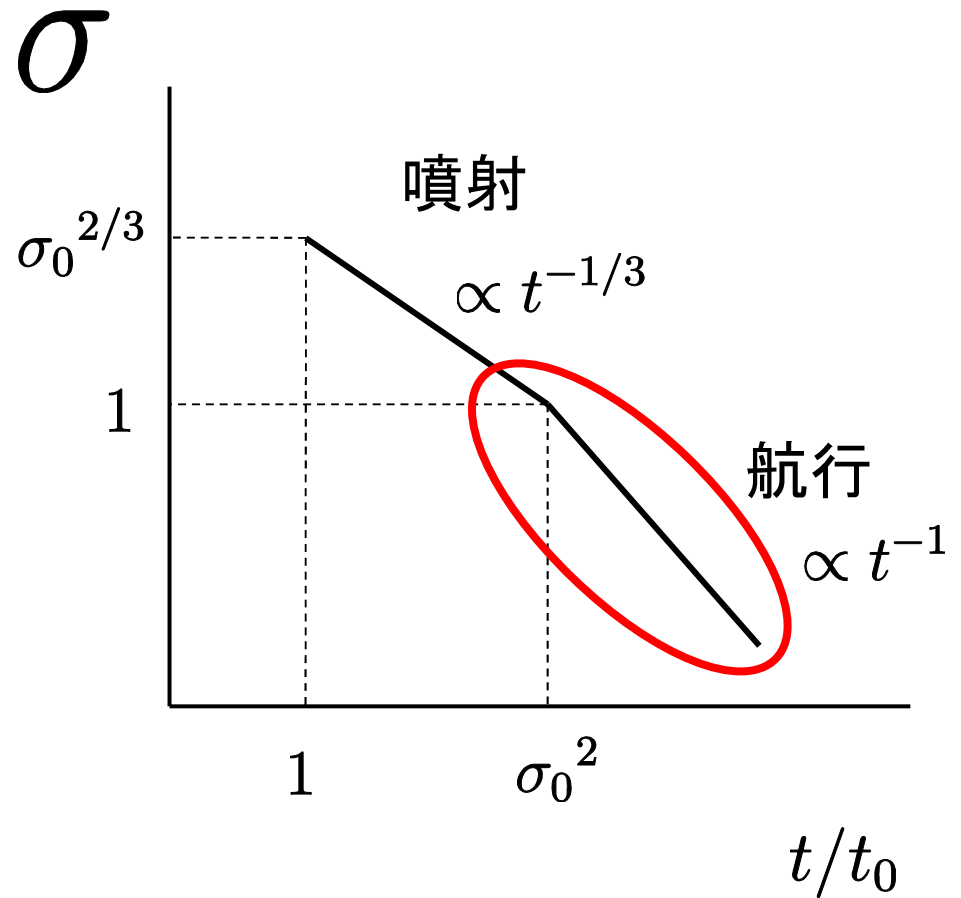
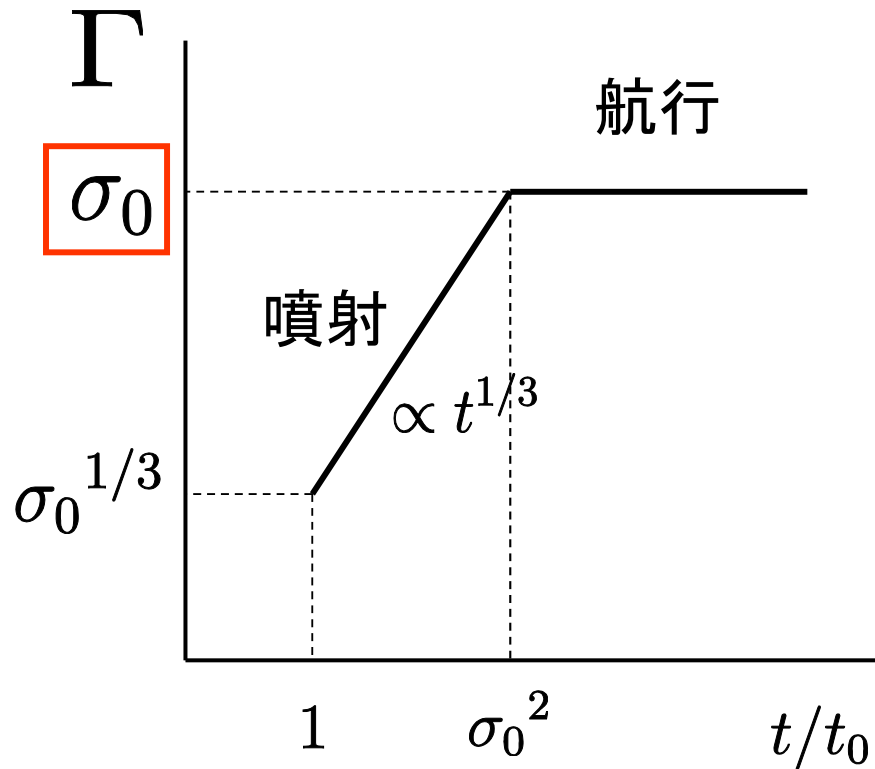


$$\sigma \propto t^{-1}$$

$t > t_c$ では $\sigma < 1$ となる



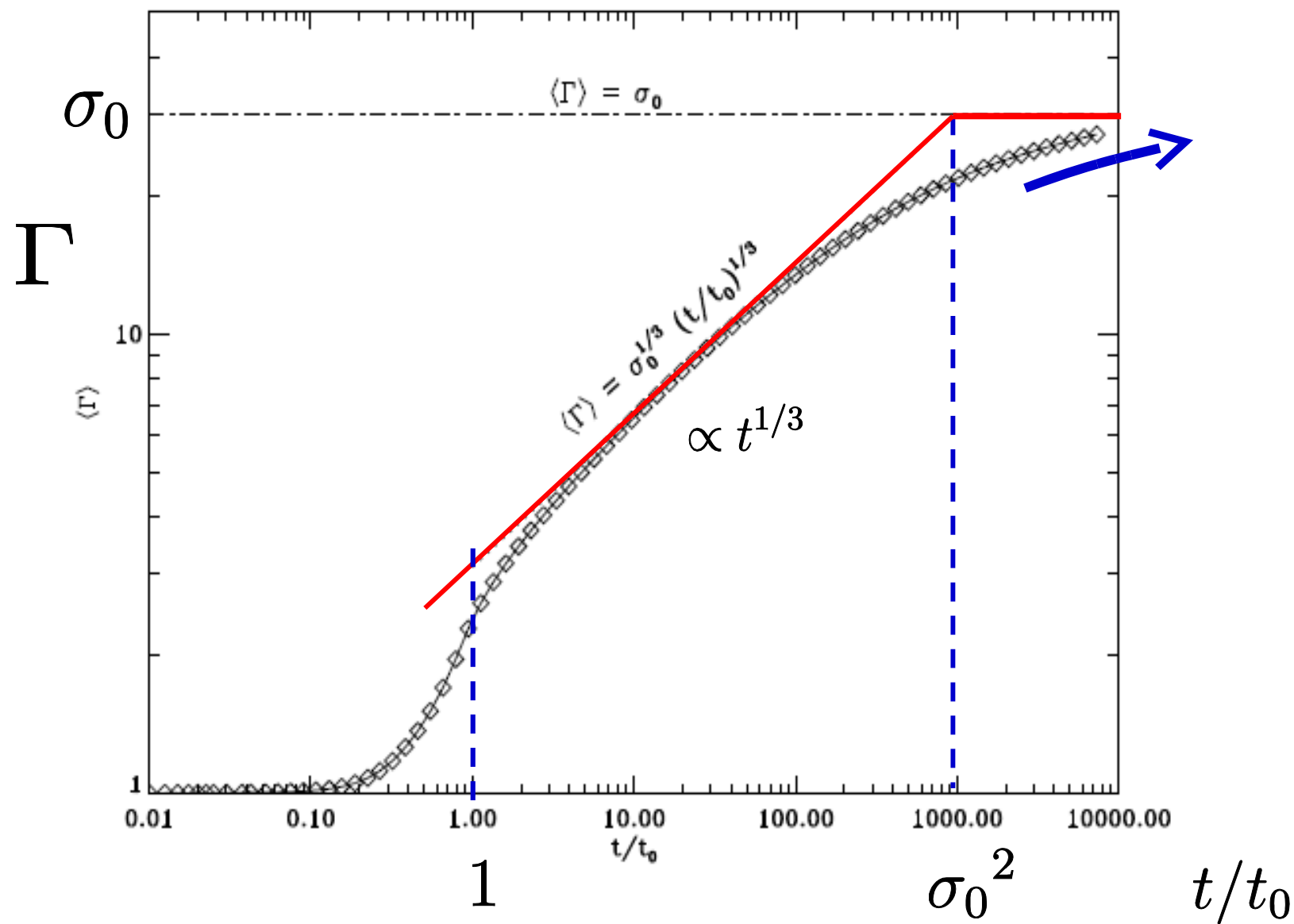
Γ 、 σ の時間発展のまとめ



$$\sigma_0 = 100 \rightarrow \Gamma = 100$$

σ 問題をクリア!

数値計算の結果

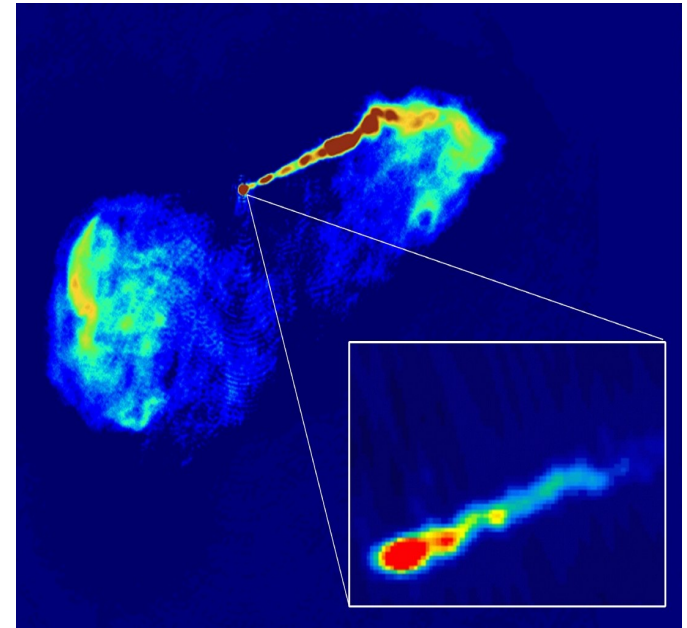


まとめ

- 磁気ロケットモデル
 - 時間依存のあるモデル。
 - σ 問題をクリアして加速できる。
 - 最終的に $\Gamma > 100$ 達成できる。
 - GRBの特徴の説明に適用できる可能性がある。

Appendix 観測データ

- ジェットの長さ: AGN(活動銀河核ジェット)
厚さ: 1kpc
円盤直径: 10kpc
ジェット: 1000kpc
- Lorentz factor $\Gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$
- シェルの最終速さ
AGN $\Gamma \sim 20$
GRB $\Gamma > 100$



電波干渉計で見た

Appendix 保存量

rest mass $M \sim \Gamma \rho_R \Delta_L$

energy $E \sim B_L^2 \Delta_L$

磁束 $\Phi \sim B_L \Delta_L$



$$\Gamma \sigma \sim \text{const} = \sigma_0$$

Appendix 離陸時の Γ 、 σ

離陸時 $v \sim c_A$

アルフベン速度

$$c_A^2 = c^2 \frac{\sigma}{1 + \sigma}$$

$$\sigma \gg 1$$

$$\Gamma' \sim \sigma_0^{1/3}$$

$$\sigma' \sim \sigma_0^{2/3}$$

Appendix 磁気エネルギーの分配

- 磁気エネルギー変換後

重心系では $u_{\pm}^{*\mu} = \Gamma_*(1, \pm\beta_*)$

重心の速さ変わらないので、実験室系から見ると

$$u_{\pm}^{\mu} = \Gamma\Gamma_*(1 \pm \beta\beta_*, \beta \pm \beta_*)$$

従って前後部の持つエネルギー比:

$$\frac{E_-}{E_+} = \frac{1 - \beta\beta_*}{1 + \beta\beta_*},$$
$$\sim \frac{1}{4} \left(\frac{1}{\Gamma^2} + \frac{1}{\Gamma_*^2} \right)$$

$$\Gamma, \Gamma_* \gg 1$$

Appendix ロケットについて

- n回目のステップでは

$$\sigma_n \sim \sigma_{n-1}^{2/3} \sim \sigma_{n-2}^{(2/3)^2} \sim \sigma_0^{(2/3)^n}$$

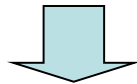
$$\Gamma_{n,0} \sim \sigma_{n-1}^{1/3} \Gamma_{n-1,0} \sim \sigma_0^{1/3 \{1 + 2/3 + \dots + (2/3)^{(n-1)}\}} \Gamma_0 = \sigma_0^{1 - (2/3)^n}$$

Appendix 航行について

シエル幅 $\Delta_R \propto t$

$$\rho_R \propto t^{-1}$$

磁束の保存 $\Phi \sim B_R \Delta_R$



$$B_R \propto t^{-1}$$

$$\sigma \propto t^{-1}$$

Appendix RMHD eq.

$$\partial_{\mu} T^{\mu\nu} = 0, \partial_{\mu}(\rho u^{\mu}) = 0 \quad \text{Maxwell eq.}$$

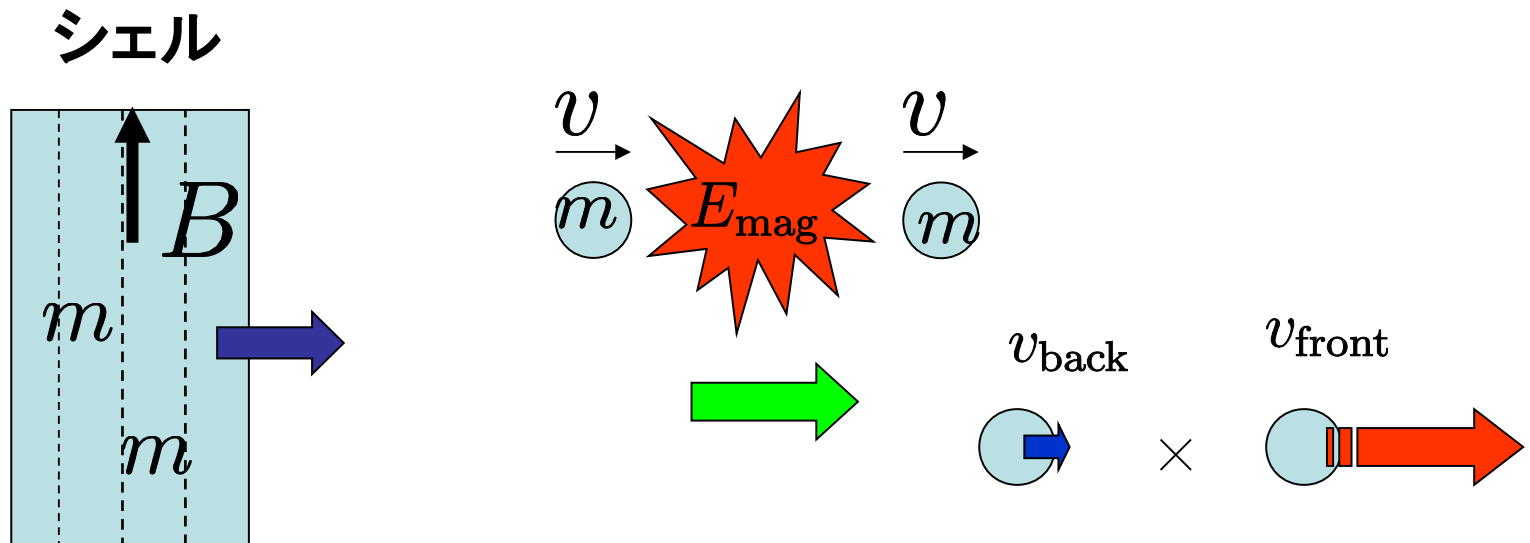
σ に相当する磁場の大きさ

$$B \sim (\rho[\text{kg/m}^3])^{1/2} (\sigma/10^3)^{1/2} 10^{11} [[\text{G}]]$$

太陽: 1 g/cm³

Appendix - 噴射 -

- 依然 $\sigma \gg 1$
- 磁気エネルギーが運動エネルギーに転換されることで、シェルは加速される。
- 相対的に前方に位置する部分が大きな Γ をもつ



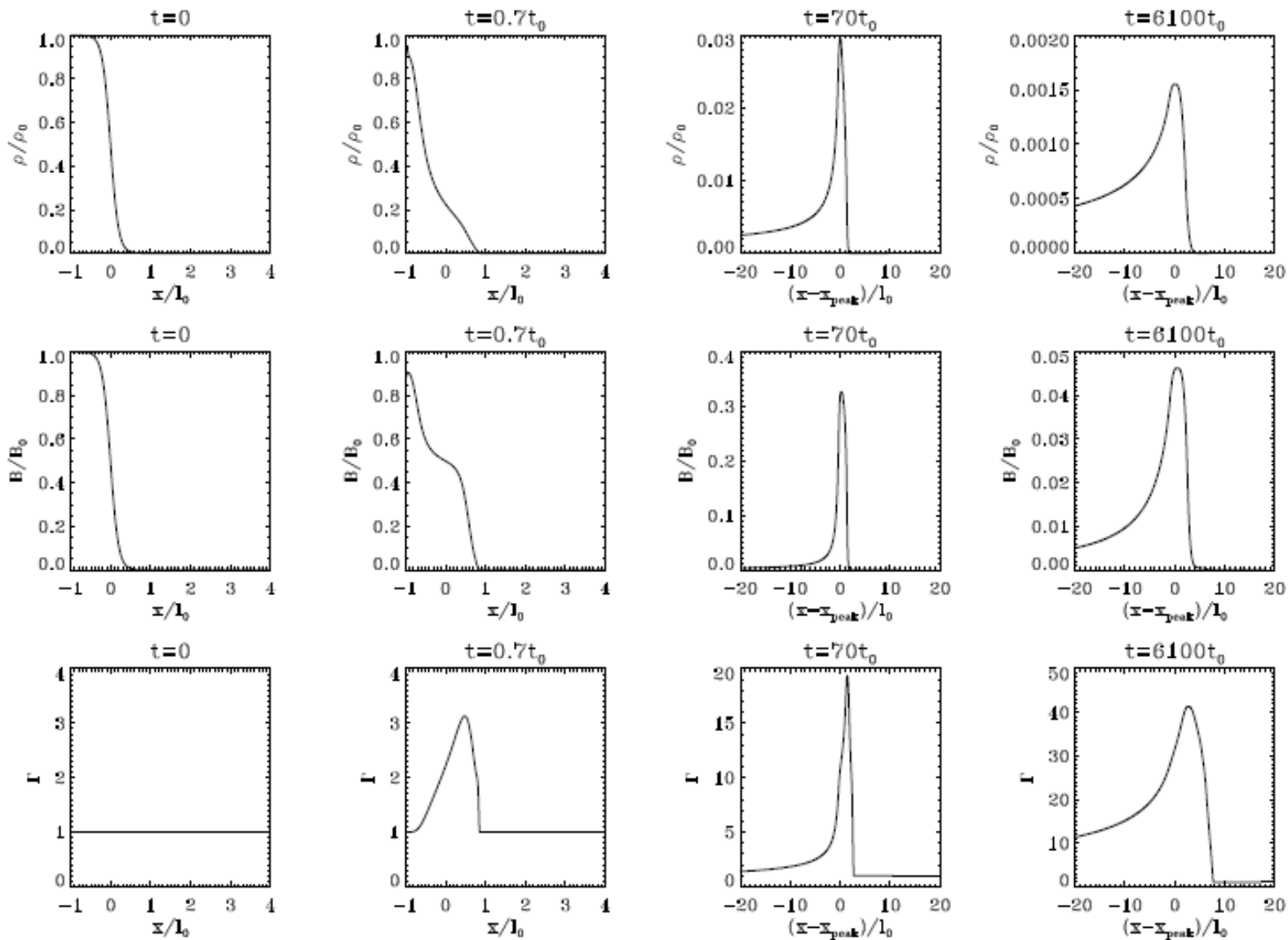


Figure 3. Snapshots of physical quantities from the numerical simulation of the evolution of a highly magnetized shell. Top row: proper density; middle row: proper magnetic field; bottom row: lab Lorentz factor. Each column corresponds to different times. Density and magnetic field are normalized by ρ_0 and B_0 such that $B_0^2/4\pi\rho_0c^2 = \sigma_0$. In the third and fourth columns, in order to follow the moving shell, the x-coordinate is centered on the location x_{peak} of the peak of the density of the shell.